

断层相关褶皱 理论与应用

——以准噶尔盆地南缘地质构造为例

FAULT-RELATED FOLD THEORY AND APPLICATION:
Case study on structural geology in southern Junggar Basin

李本亮 管树巍 陈竹新 何登发 著
John H. Shaw 雷永良 石昕 张朝军

石油工业出版社

责任编辑：马新福

责任校对：王安强

封面设计：张 娜

ISBN 978-7-5021-8084-3



9 787502 180843 >

定价：75.00元

断层相关褶皱理论与应用

——以准噶尔盆地南缘地质构造为例

李本亮 管树巍 陈竹新 何登发 著
John H. Shaw 雷永良 石 昕 张朝军

石油工业出版社

内 容 提 要

本书综合运用断层相关褶皱理论和地震解释技术,结合地质露头、地震及钻测井资料,研究了准噶尔盆地南缘构造演化、构造几何学和运动学等,确定了淮南基底结构、不同期次盆地性质与构造格局,探索了构造应变恢复的数值模拟技术,最后提出了淮南油气勘探的建议目标。

本书可供地质、构造、物探专业的研究人员及相关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

断层相关褶皱理论与应用:以准噶尔盆地南缘地质构造为例/
李本亮,管树巍等著. —北京:石油工业出版社,2010.12
ISBN 978-7-5021-8084-3

I. 断…

II. ①李…②管…

III. 准噶尔盆地-地质断层-褶皱带-地质构造-研究

IV. P548.245

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 203741 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523544

发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:17.5

字数:445 千字 印数:1—1500 册

定价:75.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

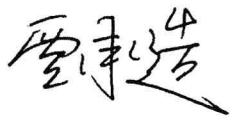
中国中西部前陆盆地油气资源丰富、储量丰度高、探明程度低，库车前陆冲断带的勘探成果进一步激励地质界和油气勘探界的探索，前陆盆地已经成为中国 21 世纪油气勘探的主要领域之一。前陆冲断带是高效大油气田勘探的主要场所，构造变形复杂、地震成像品质差，导致构造地质认识和建模困难，是制约前陆盆地油气勘探的瓶颈问题。

天山南、北两侧对称分布的库车前陆冲断带和淮南前陆冲断带，自晚古生代洋盆关闭造山以来，中、新生代接受统一的陆内构造演化和沉积充填，发育相似的油气地质条件。新生代，受环青藏高原巨型盆山体系的构造作用，天山造山带复活，前陆冲断带向两侧克拉通扩展，都发育成排成带的大型褶皱—冲断带。但是淮南和库车两个前陆冲断带的油气勘探成效大相径庭，库车已初具万亿立方米储量规模，而淮南仅仅发现零星工业油气流。《断层相关褶皱理论与应用——以准噶尔盆地南缘地质构造为例》通过淮南复杂构造地质认识和建模，揭示制约淮南油气勘探的关键问题，提出新的勘探思路。

随着断层相关褶皱理论的产生和它在构造变形几何学与运动学研究中的应用，特别是库车前陆冲断带构造建模对油气勘探的成功指导，该理论在中国前陆盆地构造地质研究中得到广泛重视，其分析方法已成为地质人员确定构造圈闭、落实储层、预测储量规模等的基本技术。本书作者多年来一直与断层相关褶皱理论的创立者 John Suppe 院士和实践者 John H. Shaw 教授等开展深入的学术交流和科研合作，对该理论有深刻的认识和独到见解。

本书在淮南大地构造背景、盆地构造演化与沉积充填特征认识的基础上，在断层相关褶皱理论指导下，开展了淮南前陆冲断带构造变形几何学、运动学、动力学和年代学的研究。通过区域构造地质剖面建模和平衡剖面恢复、二维层应变构造变形恢复和三维体应变构造变形恢复等研究，揭示淮南前陆冲断带的构造地质特征与规律、变形过程与主控因素。结合淮南油气地质条件，开展有利区带评价和重点勘探目标探索，不仅为前陆冲断带油气构造地质研究提供了范例，而且也将推进淮南油气勘探进程。

本书作者是一批年轻而快速成长的油气构造地质学家，已经在含油气盆地构造研究中展露锐气和才华，获得油气勘探界和地学界的认可。他们从油气地质研究和勘探实践出发，解决生产难题，总结经验教训，在理论与实践探索中探索和求证含油气盆地构造地质理论。

中国科学院院士 

2010 年 11 月

前 言

准噶尔盆地南缘（简称淮南）北起莫索湾地区盆参2井，南至北天山山前，西起独山子西段，东到阜康断裂带西段，东西长约300km，南北宽约80km，面积约25000km²，属北天山山前中—新生代的持续沉积拗陷区和新近纪前陆冲断带，发育多套生储盖组合，沉积岩厚达15000m。淮南是我国石油勘探最早的地区之一，自1937年发现独山子油田以来，1950—1962年围绕地表背斜找油，1958年发现齐古油田；1985—1992年围绕新近系浅层找油，发现西参2井油气流；1995年以来围绕古近系深层找油找气，发现了呼图壁气田、玛纳斯气田、卡因迪克油田以及西湖背斜、霍尔果斯背斜、吐谷鲁背斜等含油构造。特别是2006年玛纳1井油气勘探获得重大突破，探明天然气地质储量 $308 \times 10^8 \text{m}^3$ ，重燃淮南勘探的信心。据全国第三论（2002）油气资源评价，淮南石油资源量 $10.87 \times 10^8 \text{t}$ ，天然气资源量 $5671 \times 10^8 \text{m}^3$ ，目前油气探明率仅3.7%，展示出较大的勘探潜力。截至2005年底，完成了1:20万重磁力普查和1:10万地质详查：共完成二维地震21630km，三维地震926km²；完成探井总数240余口，已发现的构造均有不同程度钻探，但密度较稀。

早在20世纪初，该区就以齐全的地层露头、多种类型的构造样式和丰富的地面油气苗，吸引了大批中外石油地质家考察并从事油气勘探工作。德国的哥罗比尔（1907—1909）、原苏联的杜阿也夫（1942—1943）、我国著名地质家黄汲清等先后来到淮南进行过路线踏勘和地质考察。新中国成立后，中苏石油公司在此进行了大量的地面地质调查，基本上弄清了淮南的地面地层和构造特征。20世纪90年代初，对重要构造加密地震勘探，基本落实了淮南三排背斜带的地表构造特征。受淮南地质结构和地震资料条件的限制，存在三个主要构造问题：①强挤压造成构造变形复杂，构造圈闭落实困难；②缺乏系统的盆地构造分析，主力勘探层系和构造区带不明确；③缺乏科学的构造地质模型来指导地震解释。

2005年以来，中国石油科研人员与哈佛大学John H. Shaw教授、地质大学何登发教授等合作，运用断层相关褶皱理论和构造地震解释技术，综合利用地表地质、地震和钻测井等资料，开展了淮南盆地构造演化、构造几何学与运动学建模、构造地震解释与构造特征解剖、有利勘探区带评价等研究，确定了淮南基底结构、不同期次的盆地性质与构造格局、新构造活动的年代学特征、前陆冲断带构造变形几何学与运动学特征等，探索了二维和三维空间中构造应变恢复的数值模拟技术、前陆构造应变分析与预测技术，提出了淮南油气勘探的有利区带和目标。

第一章介绍了断层相关褶皱理论的要点和三种端元模式的几何学与运动学特征。自Rich（1934）提出断层转折褶皱几何学以来，Suppe（1983）首次建立了褶皱形态、断层形态和断层滑动之间的定量关系。断层转折褶皱、断层传播褶皱和滑脱褶皱作为三种最基本的断层相关褶皱类型，构成前陆褶皱—冲断带构造定量研究的基础，并且建立了断层转折褶皱理论、断层端点褶皱理论（如断层传播褶皱、断层滑脱褶皱）、断层相关褶皱叠加构造的一系列几何学与运动学模型。本书结合地表、遥感和钻测井资料，将等倾角区划分和轴面分析等几何学方法应用到构造解释中，从变形形态、变形量、变形时间和变形机制四个方面去构

建模型,建立了一套复杂构造建模技术方法。

第二章通过研究区糜棱岩和花岗岩锆石 U—Pb 测年数据的综合分析,提出在淮南山前带及邻区存在早晋宁期结晶基底、晚加里东褶皱基底和华力西期褶皱基底。三套不同时代、不同性质基底的叠加,共同组成了淮南及邻区特有的基底结构。

第三章在淮南及邻区识别出上石炭统柳树沟组到中新统塔西河组之间的 7 个区域性不整合面,将淮南山前带及邻区的上石炭统一第四系划分为 4 个构造层序及 14 个亚构造层序。淮南山前构造带自晚石炭世以来主要经历了三次强烈的冲断造山过程:晚二叠世—中三叠世安尼期(260—233Ma),中侏罗世巴通期—晚侏罗世艾维尔沟期(170—142Ma),上新世以后(5.3Ma 至今)。恢复了淮南及邻区在晚石炭世以来主要成盆期的盆地原型。

第四章阐述了淮南的构造格架与变形特征。淮南第一排构造为古生界推覆体及其下盘两个中生界—古生界岩片叠加而成的楔状构造。第二排构造为多个断层转折褶皱与楔形构造叠加而成。第三排背斜带主要表现为滑脱褶皱和层间剪切变形。淮南山前深部楔状体上覆生长地层特征,确定上新世早期,大约 4.2~5Ma 是淮南各排背斜的主要形成期。

第五章解剖了淮南构造变形的几何学与运动学特征。淮南山前深部楔状体由两个叠加的断层转折褶皱以及褶皱前翼的反冲断层构成。第一排背斜带形成于深部构造楔前缘的反冲作用,构造楔向北扩展过程中,一部分位移量沿构造楔顶部的反冲断层向南消减,形成第一排背斜带,而另一部分位移量则沿中—上侏罗统西山窑组($J_{2-3}x$)煤层内部的滑脱断层向北传递至第二排背斜带,因此,在总位移量保持稳定的条件下,第一排背斜带和第二排背斜带在走向上的此消彼长反映位移量在南、北两个方向上的转换。通过淮南全区构造层编图,显示出两套滑脱层($E_{2-3}a$ 、 $J_{2-3}x-K_1tg$)控制三个构造变形层,即古近系安集海河组($E_{2-3}a$)滑脱层以上东高西低的构造格局;安集海河组与侏罗系西山窑组这两个滑脱层之间为两端高中间低,西山窑组以下中—下侏罗统为断陷结构的特征。

第六章探索了淮南前陆冲断带二维和三维空间中构造应变恢复的数值模拟、前陆构造应变分析与预测技术。断层相关褶皱研究的一个趋势是三维构造应变分析,本书提出了包含地层力学结构、位移场和应变场在内的三维构造建模与复原技术,借助三维可视化技术确定构造在三维空间的应变特征,预测裂缝带发育位置、强应变带分布部位,从而为油气储集体预测与开发方案服务。

第七章提出了淮南油气勘探的有利区带和关键目标。从基底结构控制下的淮南盆缘构造讨论了前陆冲断带构造圈闭勘探和前缘斜坡、前缘隆起的地层、岩性圈闭勘探。从淮南原型盆地分布与构造演化讨论了油气条件、成藏组合与成藏特征以及构造格局与新构造活动所决定的淮南油气成藏特征。从淮南构造变形特征提出了淮南油气勘探部署建议:精细勘探淮南中段霍尔果斯—玛纳斯—吐谷鲁构造带紫泥泉子组目的层,重点突破霍尔果斯、吐谷鲁两点,向东西分别延伸;拓展勘探两端低幅度构造,重视东端侏罗系—白垩系燕山期构造,加快西端沙湾组—安集海河组岩性圈闭勘探;探索深层白垩系大场面,加深钻探霍尔果斯、呼图壁构造;从淮南楔形构造与构造分层提出了霍尔果斯、吐谷鲁构造的精细构造建模与勘探建议;从淮南构造转换带发育特征发现了玛东构造圈闭勘探。

本项研究成果是集体科研智慧的体现,李本亮组织了该项研究的实施和专著编写,具体分工如下:

前言:李本亮。

第一章:李本亮, John H. Shaw, Andreas Plesch, 管树巍, 陆杰明。

第二章：李本亮，何登发，雷永良。

第三章：何登发，李本亮，方世虎，高志勇，石昕。

第四章：管树巍，李本亮，石昕，陈竹新，杨庚，张朝军，雷永良。

第五章：陈竹新，李本亮，管树巍，John H. Shaw, Andreas Plesch, 石昕。

第六章：管树巍，Andreas Plesch, 李本亮，陈竹新，石昕，雷永良。

第七章：李本亮，管树巍，陈竹新，赵孟军。

本书是在中国石油集团科技管理部、中国石油勘探开发研究院大力支持与指导以及新疆油田公司研究院协助下完成的。在研究过程中，得到了中国石油集团科技管理部方朝亮教授、李锋高级工程师，中国石油勘探开发研究院陈英处长、张水昌教授、宋岩教授，新疆油田公司况军副总经理、张越迁所长、李学义高级工程师、唐建华高级工程师，南京大学贾东教授，浙江大学陈汉林教授等人的支持。在整个课题的实施和研究中，有幸得到了贾承造院士、赵文智教授、邹才能教授、高瑞祺教授等的指导和建议，在此一并表示衷心感谢。

由于笔者水平所限，文中错漏之处，敬请读者批评指正。

目 录

第一章 断层相关褶皱的基本原理与前陆冲断带构造变形解析方法	(1)
第一节 前陆冲断带构造研究进展	(1)
第二节 断层相关褶皱基本理论	(4)
第三节 前陆冲断带构造建模的基本方法与技术	(32)
第二章 淮南基本地质概况	(47)
第一节 淮南区域构造背景	(47)
第二节 准噶尔盆地的基底结构	(56)
第三节 淮南沉积地层系统及其接触关系	(66)
第三章 淮南沉积盆地构造演化及其原型分析	(73)
第一节 晚石炭世—中二叠世陆内裂谷阶段及其盆地原型	(73)
第二节 晚二叠世—早三叠世挤压拗陷阶段及其盆地原型	(86)
第三节 中—晚三叠世准平原化构造阶段及其盆地原型	(90)
第四节 早—中侏罗世弱伸展构造及其盆地原型	(92)
第五节 中—晚侏罗世挤压拗陷构造阶段及其盆地原型	(97)
第六节 白垩纪—古近纪拗陷盆地阶段及其盆地原型	(100)
第七节 新近纪—第四纪淮南前陆冲断构造及其盆地格局	(105)
第四章 淮南前陆冲断带构造地质特征	(111)
第一节 淮南构造分布特征	(111)
第二节 第一排楔形构造地质特征	(119)
第三节 第二排霍尔果斯—玛纳斯—吐谷鲁构造带特征	(130)
第四节 第三排独山子—安集海—呼图壁构造带特征	(151)
第五章 淮南冲断构造变形的几何学和运动学特征	(162)
第一节 淮南中段区域骨干地震剖面的构造地质解释	(162)
第二节 淮南楔形构造的分布、叠加序列与油气勘探	(178)
第三节 淮南构造地质的分层结构及其空间展布特征	(187)
第六章 淮南构造变形的二维和三维应变恢复	(196)
第一节 构造恢复方法	(196)
第二节 二维和三维地质构造模型的建立	(198)
第三节 二维地质构造应变恢复	(208)

第四节	三维地质体的构造应变恢复	(216)
第七章	从构造地质特征讨论油气勘探	(229)
第一节	从基底结构论盆缘构造油气勘探	(229)
第二节	从淮南原型盆地分布与构造演化论油气地质特征	(232)
第三节	从淮南构造变形特征论有利勘探区带	(241)
第四节	从淮南楔形构造与构造分层论评价勘探	(248)
第五节	从淮南构造转换带论风险勘探新领域	(254)
参考文献		(259)

第一章 断层相关褶皱的基本原理与 前陆冲断带构造变形解析方法

第一节 前陆冲断带构造研究进展

一、前陆盆地基本概念

Dickinson (1974) 在研究板块与沉积作用时, 提出前陆盆地一词, 认为前陆盆地是介于山系前缘及相邻克拉通之间的沉积盆地。冲断负荷引起的挠曲沉降是盆地形成的基本原因, 前陆盆地是“在前陆构造环境中冲断负荷、隆升剥蚀、挠曲沉降、沉积充填相互作用的动力学过程中形成的盆地”。一般来说, 前陆盆地是位于造山带前缘与相邻克拉通之间的沉积盆地, 是沿着前陆冲断带的克拉通一侧作线状(或带状)沉降而形成的。从全球范围看, 它伴随造山作用过程出现, 是形成于造山环境中的挤压型沉积盆地; 从形态上看, 它是高度不对称的, 向着造山带方向增厚, 向着克拉通方向减薄并逐渐与克拉通层序合并。

前陆盆地的沉积演化与毗邻的褶皱逆冲带构造演化之间有着密切关系, 前陆岩石圈的弯曲变形是前陆盆地形成的根本原因(曹守连等, 1994; 何登发等, 1995; 甘克文, 1995)。前陆盆地挠曲的前提是岩石圈早期的伸展变薄和热沉降, 俯冲作用的牵引力和仰冲作用的负荷力促使岩石圈挠曲形变成前陆盆地。聚敛碰撞之前, 前陆岩石圈表现为被动边缘的拖曳弯曲和减薄或裂谷期正断作用继续发育; 聚敛之后, 首先是俯冲板块刮削物质的堆积和俯冲板块对上覆板块的拖曳使前陆发生弯曲; 碰撞开始后, 碰撞带的增生造山负荷给岩石圈加载, 同时由于地壳的均衡作用, 使前陆区发生弯曲。当造山带的剥蚀产物堆积于前陆盆地中, 这时的沉积物对岩石圈而言为沉积负载, 对岩石圈的弯曲具有促进作用(张明利等, 2002)。另外, 前陆岩石圈的弯曲还受到岩石圈力学性质及流变特性的控制。根据典型前陆盆地的发育历史, 许多学者认为, 前陆岩石圈在弯曲过程中表现出黏弹性体的变形特征, 即岩石圈在受载荷作用之后, 首先发生较快速度的弹性变形, 之后随着时间的推移, 即使应力不再增加, 岩石圈也会由于物质调整和应力松弛, 发生黏性应变, 从而继续下弯(Watts, 1992; Beaumont 等, 1988)。

前陆冲断带作为前陆盆地的一个构造单元, 自 Price (1973) 首次将冲断作用、挠曲沉降与地层沉积有机地联合在一起来讨论前陆盆地的演化时, 已经预示着前陆盆地理论模式的逐渐确立。20 世纪 80 年代以来, 深化了岩石圈挠曲作用的概念, 将前陆冲断带的构造负荷与前陆地区的挠曲沉降相联系, 前陆冲断带的发育阶段在很大程度上控制了前陆盆地的充填阶段, 例如, Stockmal 等 (1992) 二维非均一弹性板块模型, Sinclair 和 Allen (1992) 地层模拟的扩散模型, Beaumont (1981, 1988) 的黏弹性三维挠曲模型, Cloetingh (1988, 1990)

板内应力挠曲模型, Watts (1982, 1992) 的进积沉积负荷的岩石圈挠曲模型, Waschbusch 和 Royden (1992) 的横向强度变化与非弹性屈服大陆岩石圈的挠曲模型, Stern (1992) 三维挠曲模型等。这些模型将前陆冲断带的构造负荷作用、挠曲沉降作用、剥蚀与搬运作用、充填作用有机地结合起来, 将前陆盆地动力学的认识提高到一个新的高度。

二、前陆冲断带研究的进展

20 世纪 90 年代以来对前陆冲断带认识的成熟, 不仅表现在实践上, 而且表现在地质理论上与研究方法上。主要有以下 4 个方面:

(1) 对于前陆冲断带地质结构的认识随着山地高分辨率地震与三维地震勘探技术的发展日益提高。地震剖面反映的构造样式日益清晰, 细节更为清楚, 对不同断层之间的组合或过渡关系, 冲断系统的特点都有了不同于以前的认识。勘探技术的提高, 使得勘探难度非常大的前陆冲断带再次成为勘探的热点。例如, 南美新生代弧后盆地、中国中西部前陆盆地等, 成为了油气勘探的热点。

(2) 前陆冲断带的分析方法逐渐完善。除了应用重、磁、电、地震等地球物理手段综合分析以外 (如联合反演), 在地质理论上, 断层相关褶皱理论逐渐成熟。断层相关褶皱理论是 Suppe (1983) 提出的, 认为在地壳浅层断裂活动与褶皱作用之间是两种主要的构造变形方式, 二者之间具有非常密切的成因关系, 进而提出了断层相关褶皱的三种端元类型: 断层转折褶皱 (Fault bend fold)、断层传播褶皱 (Fault propagation fold)、断层滑脱褶皱 (Fault detachment fold) 及其组合类型 (例如双重构造、构造楔等) 的几何学与运动学。该理论在塔里木盆地的库车地区与西昆仑山前、川西龙门山前已有初步应用, 并已取得了较大成果, 例如克拉 2 号大气田与阿克莫木气田在钻前的构造解释中, 主要应用了断层相关褶皱的理论与方法。

(3) 前陆冲断带构造变形几何学与运动学朝定量化研究发展。主要表现在: ① 1990 年在伦敦召开了冲断构造的第二次会议, 出版了会议论文集《Thrust tectonics》。主要讨论了前陆冲断带的成因机制、发育阶段与分析方法, 以及对比利牛斯、阿尔卑斯、喜马拉雅、科迪勒拉等前陆冲断带进行了实例解剖, 对其成因机制, 提出了库仑楔原理, 并进行了物理模拟实验。将断层相关褶皱作用与沉积作用相联系, 提出了生长地层与生长楔的概念, 利用生长地层定量地揭示断裂活动与褶皱作用的速率。② 2000 年 6 月, AAPG 出版了石油构造地质学专辑, 对构造地质学中的一些新方法在前陆冲断带中的应用进行了有益的探讨。③ 继 Bally 主编油气勘探地震图集之后, 断层相关褶皱理论的创建人和实践者 J. Shaw, J. Connors, J. Suppe 在 2004 年出版了前陆地区断层相关褶皱研究的 AAPG 图集, 集中讨论断层相关褶皱的原理、方法及其在地震构造解释中的应用, 随后该图集的 2005 年新版被夏义平等 (2008) 翻译成中文。④ 对西欧典型前陆冲断带进行跨学科跨领域的合作研究。以 Mascle 等 (1998) 领导的盆地动力学研究组应用现代多种手段对比利牛斯、阿尔卑斯等山前冲断带及其前陆盆地进行了深入研究, 出版了《Cenozoic foreland basin of Western Europe》一书, 可以看作迄今盆—山耦合研究的典范。

(4) 从前陆盆地系统的视角研究前陆冲断带。除了对前陆盆地成因 (如构造、沉积演化) 进行讨论之外, 也更多地讨论二者流体之间的相互关系。就油气勘探而言, 主要侧重于油气流体。自从 Allen 和 Homewood (1986) 主编了《Foreland basins》以来, Macqueen 和

Lecike 等 (1992) 主编了《Foreland basins and Fold belts》一书, 该书以西加拿大盆地、扎格斯盆地、东委内瑞拉盆地、阿拉斯加北坡盆地、落基山前陆、沃希托盆地为重点, 对与其相邻的前陆冲断带的油气聚集与成藏进行了重点讨论。

三、前陆冲断带构造变形研究进展

近年来, 在冲断带推覆褶皱构造研究方面同样取得了长足的进展。前陆褶皱冲断带主要是盖层推覆体, 一般遵循薄皮构造变形规则, 表现为脆性逆冲推覆, 而由断层形成的相关褶皱则表现为无根褶皱, 如断层转折褶皱、断层传播褶皱及滑脱褶皱。而造山带内结晶逆冲构造主要是基底推覆体, 呈现厚皮构造变形规律, 一般形成于地壳深层 (中、下地壳) 韧性或脆—韧性过渡环境中, 相应的褶皱大多为大型平卧或斜卧褶皱, 具有倒转翼, 倒转翼的韧性变形明显强于正常翼。在阿尔卑斯造山带, 许多基底推覆体上的沉积盖层部分缺失, 而阿尔卑斯造山带外带的许多盖层冲断推覆体 (cover thrust nappes) 与该造山带内带基底褶皱推覆体 (basement fold nappes) 的形成有直接关系 (Eckert 等, 1993)。不过, 两者的变形特征既有共同点, 也有不同之处, 结晶基底逆冲推覆体的形成机制与前陆褶皱冲断带的形成机制不同。由此可见, 造山带逆冲推覆构造研究既不能只按某一种模式 (薄皮模式或厚皮模式), 也不能只按某一种机制 (冲断推覆或褶皱推覆) 来进行, 更不能把脆性盖层冲断推覆与韧性结晶基底褶皱推覆分割开来研究。

发展到目前, 有关逆冲推覆构造几何学、运动学的概念模型和力学模型已逐渐完善, 尤其是造山带前缘前陆褶皱冲断带的逆冲构造体系以及与逆冲断层相关褶皱的几何学与运动学特征, 已作了比较全面的总结与概括, 主要进展有以下几方面 (吴运高等, 2000):

(1) 前陆褶皱冲断带呈一楔形体, 其发展演化过程主要遵从临界库伦楔模型。楔形体模型是由 Elliott (1976) 与 Chapple (1978) 首先提出来的, 随后由 Dahlen 等 (1984, 1990) 与 Davis 等 (1983) 进一步发展成临界库伦楔模型。这一模型已被成功用于解释增生楔与前陆褶皱冲断带的演化, 如 Dahlen (1990), Dahlen 和 Suppe (1988), Willett (1992) 等, 不过 Woodward (1989, 1992) 对这一模型持批评态度。

(2) 前陆褶皱冲断带 (或增生楔) 中发育的逆冲断层一般呈台阶式的几何结构, 由断坪与断坡组成。断坪 (flat) 一般沿滑脱层 (软弱岩层如页岩、膏岩层、煤层等) 发育, 而断坡 (ramp) 则一股是由断层自断坪向上切割强硬岩层 (能干层) 而形成 (Dahlstrom, 1969)。

(3) 前陆褶皱冲断带发育一系列与逆冲断层相关的褶皱。主要有三大类, 它们的几何特征分别由不同的地质学家进行了精细的分析, 具体为: ①断层转折褶皱, 见 Jamison (1987), Suppe (1983, 1984), 这是台阶状逆冲断层相关褶皱的最基本样式; ②断层传播褶皱, 见 Jamison (1987), Mitra (1990), Mosar 和 Suppe (1992), Suppe (1984, 1990) 等; ③滑脱褶皱, 见 Jamison (1987), Mitra 和 Narnson (1989)。Suppe 等 (1992) 还对生长褶皱 (包括生长断层转折褶皱和生长断层传播褶皱) 作过详细地分析。

(4) 前陆褶皱冲断带发育的逆冲断层组合有多种, 主要有叠瓦扇——分为前展式与后展式, 双重构造 (Duplex) ——分为倾向后陆式、倾向前陆式与背形堆垛式 (也叫背驮式) 等 (1982)。在前方常发育有反冲断层、构造三角带与冲起构造。这些组合类型是由 Dahlstrom (1970)、Boyer 等 (1982) 与 Mitra (1986) 提出的, 并由 Woodward 等 (1989) 作了修正。需要指出的是, Mitra (1986) 在 Boyer 等 (1982) 所划分的 3 种双重构造类型的基

基础上作了进一步修改,然后划分出更精细的双重构造类型,分为A类(包括独立的断坡背斜、后陆倾斜式双重构造)、B类(真正的双重构造,包括下盘为断坡背斜式,上盘为断坡背斜式,前缘带为断坡背斜式)、C类(包括超叠断坡背斜——由前展式向背形堆垛演化、前陆倾斜式)。

(5) 前陆褶皱冲断带的逆冲断层及相关褶皱发育演化的时序(Macclay, 1992)可分为:①前展式,②后展式,它们都属于正序逆冲,与之相对,则有③反序逆冲。以上三类都是异时逆冲。Boyer(1992)还提出第④类即同时逆冲时序。

(6) 关于断层相关褶皱的生长方式,早期的观点趋向于褶皱是以自相似的方式生长的(Suppe, 1983);后来,Epard等(1996),Fisher等(1992),Hardy和Poblet(1994),Poblet等(1995),Zapata和Allmendinger(1996)则认为褶皱并不是以这种方式生长的。而Homza和Wallace(1995),Poblet和McClay(1996)则认为褶皱既可以自相似方式生长,也可以非自相似方式生长,这取决于冲断深度是否变化及其他因素。

第二节 断层相关褶皱基本理论

自从Rich(1934)研究阿巴拉契亚前陆冲断褶皱带以来,在70多年的时间里,人们对冲断推覆构造及断层相关褶皱进行了大量的理论与实践,发现地壳浅部的褶皱变形与下伏断层的滑移有关。Suppe(1983)发表的《断层转折褶皱的几何学与运动学》一文,详细地阐述了断层转折褶皱的几何学特征,提出了上盘褶皱与下伏相关断层滑移之间的定量关系,为前陆冲断褶皱带的几何学与运动学分析奠定了基础。随后断层相关褶皱理论被广泛应用在前陆褶皱冲断带构造研究中。经过多年的努力,人们相继总结了断层转折褶皱、断层传播褶皱和滑脱褶皱的构造模型和成因机制,为定量化分析和研究前陆褶皱冲断带构造几何学和运动学提供了理论依据(Suppe和Medwedeff, 1990; Jamison, 1987; Shaw等, 2005)。

准噶尔盆地南缘属于前陆褶皱冲断带,处于挤压构造背景,以发育冲断推覆构造为特征,在靠近山根处发育基底卷入式构造;在其前陆褶皱冲断带发育低角度逆掩断层及其相关褶皱,断层转折褶皱、断层传播褶皱、滑脱褶皱是常见的三种褶皱类型。由于逆掩断层和褶皱的叠加,使得淮南的构造形态非常复杂,形成多条逆掩断层或逆掩席组合成的逆掩系统(如双重逆掩构造、叠瓦逆掩构造、楔形构造、三角带),本书利用下面介绍的断层相关褶皱理论对几个重点构造进行了构造建模。

一、断层相关褶皱的三种端元模型

随着前陆盆地沉降,造山带冲断构造向前陆盆地推进,使前陆盆地沉积地层发生变形,形成各种褶皱与冲断样式,而且可以观察到褶皱与冲断层之间的连锁关系,如双层构造、叠瓦构造和三角带等。这种关系在断坪或断坡情况都可发育。在前陆褶皱冲断带中,褶皱与断层作用是密切相关的,是脆性与韧性变形作用的综合表现形式(Strayer和Hudleston, 1997)。

断层相关褶皱主要有以下三种常见形式:①断层转折褶皱(Suppe, 1983, 1985; Jamison, 1987),断层通过断坡由一个断坪传到另一个断坪,上盘岩层按下盘的形状形成褶皱,即为断层转折褶皱;②断层传播褶(Suppe和Medwedeff, 1984; Suppe, 1985, 1990; Jami-

son, 1987; Mitra, 1990; Mosar 和 Suppe, 1992), 即冲断层断坡的端点附近形成的褶皱, 吸收了冲断层全部的滑移量; ③ 滑脱褶皱 (Jamison, 1987; Mitra 和 Narnson, 1989), 与断层传播褶皱相似, 形成于断层端点, 但与断坡无关, 是发育在平行层面的滑脱面或冲断层之上的褶皱。上述三种褶皱都是由冲断层形成的, 但在其他情况下, 褶皱的形成也可早于冲断层 (Dixon 和 Liu, 1992), 断层切穿褶皱 (break - thrust folds) (Fischer 等, 1992; Woodward, 1992) 即为这种褶皱, 冲断层大致平行于上盘和下盘的岩层, 但是在褶皱翼部呈高角度切穿岩层。Suppe 等 (1992) 还对生长褶皱作过详细地分析。

几何学分析主要是根据翼间角 γ 、断坡角 σ 、褶皱幅度 a 、切割地层厚度 f 等参数 (图 1-1), 同时也应考虑到两翼增厚或减薄的情况。一般情况下断层传播褶皱的幅度大致等于

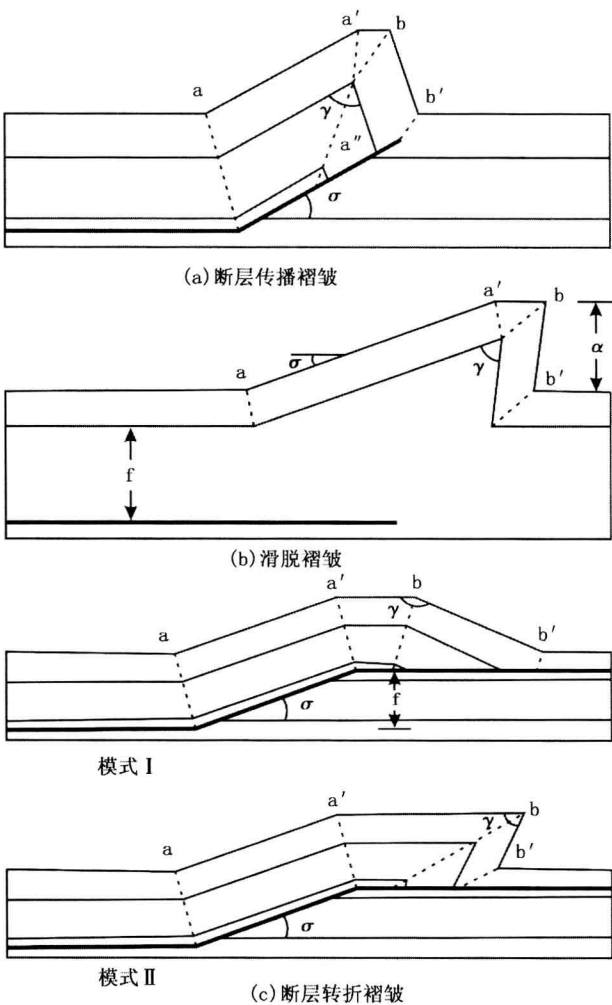


图 1-1 断层相关褶皱的三种基本端元模型 (据 Jamison, 1987)

台阶状断层在下滑脱面内的位移量等于上覆褶皱后翼活动轴面 a 和固定轴面 a' 之间的宽度, 在上滑脱面内的位移量则等于上覆褶皱前翼活动轴面 b 和固定轴面 b' 之间的宽度, 显然, 轴面 $a-a'$ 之间的宽度要大于轴面 $b-b'$ 之间的宽度, 也就是说, 由于褶皱的吸收作用, 台阶状断层在下滑脱面内的位移量要大于上滑脱面内的位移量 (注: 轴面的“固定”和“活动”是相对于轴面所在的地质体而言)

断层切割的地层厚度 f ，滑脱褶皱则不受此限制。断层转折褶皱的翼间角常大于 90° 。但是当断层转折褶皱属于模式Ⅱ时，则难与断层传播褶皱区分，因此只能借助于力学分析来进一步制约断层/褶皱样式之间的差异。

力学分析主要分析在相同岩层组合中断层/褶皱样式发育时的应力状态。根据屈曲作用和断层作用的不稳定包络线形态来确定在一定应力状态下是屈曲作用优先还是断层作用优先。由于褶皱/断层是发育在成层层序中，因此在力学上具有各向异性。假定主应力轴 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 是平行或垂直于岩层，在低围岩情况下，当 σ_1 方位与岩层小于 45° 时，破坏应力变小，岩层容易发生脆性断层作用；当平行岩层发生挤压时，应力超过屈曲作用的临界负荷时就处于失稳状态，岩层则偏转形成正弦波形，产生滑脱褶皱。应力轨迹则与地层埋藏深度和大地构造环境有关，由于褶皱/断层样式常发生在相似的滑脱层中，因此埋藏深度就成为临界因素。总的说来滑脱褶皱发生在比较浅的深度，而断层转折褶皱则发生在较深的深度。断层转折褶皱则比滑脱褶皱和断层传播褶皱有较大的翼间角，同时也常具有较大的油气前景。

二、断层转折褶皱

断层转折褶皱的运动学模型由 Suppe (1983) 建立。如图 1-2 所示，岩层变形发生在活动轴面和不活动轴面之间的区域，这两个轴面位于断层的上方，活动轴面下端位于断层的拐点（断层面倾角发生变化的位置）上。变形首先发生于活动轴面，活动轴面左侧的岩层未发生倾斜变形，变形岩层沿断层向上滑移。不活动轴面代表了活动轴面的原始位置，变形前不活动轴面与活动轴面重合，变形发生后不活动轴面与活动轴面分离，活动轴面位置不变，不活动轴面沿断层面滑移，不活动轴面与活动轴面之间的区域组成膝折带，膝折带的宽度等于断层的滑移量。膝折带迁移（加宽）形成断层转折褶皱，褶皱翼部倾斜岩层的倾角不变，倾斜岩层的宽度与断层滑移量呈正比关系。这样形成的褶皱后翼长（取决于下盘断坡），前翼短，后翼平缓，前翼倾角可达 $10^\circ \sim 30^\circ$ 以上，背斜一般发育平顶。

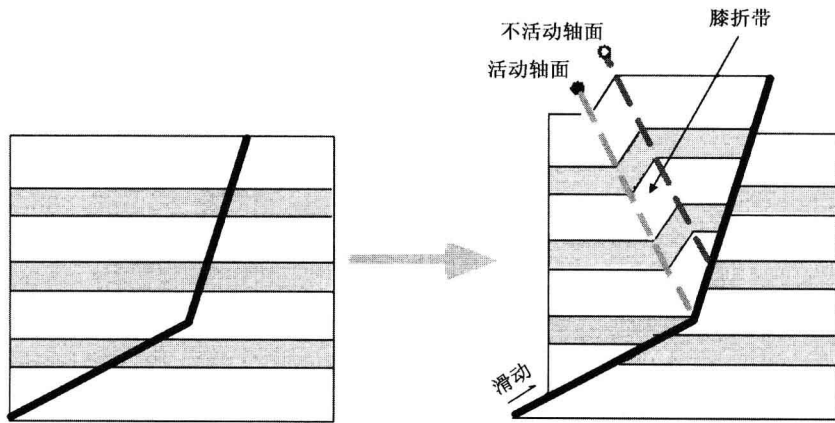


图 1-2 断层转折褶皱模型 (Suppe, 1983)

Suppe (1983) 提出了一个定量方法，把褶皱形态与冲断层的几何学联系起来，便于构建理想的断层转折褶皱的平衡剖面。应用 Suppe 的运动学模型，把变形构造恢复到变形前状态，需要以下几个假定条件：①断坪—断坡—断坪的断层形态形成于断层滑动之前或滑动开

始之时；②上盘在固定的下盘之上运动；③下盘不变形；④上盘断坪上的断层位移是不变的，而在上盘断坡上，位移向上减小（McConnell 等，1994，1997）。

按断层面的产状，可将断层分为向形断层与背形断层。向形断层转折褶皱形成于向上凹曲的向形断层之上（图 1-3a），其活动轴面位于褶皱向斜区（断层的拐点上）；不活动轴面位于褶皱背斜区，随断层的滑移而迁移。背形断层转折褶皱形成于向下凹曲的背形断层之上（图 1-3b）；活动轴面固定在断层拐点上，通常位于褶皱背斜区；不活动轴面则位于向斜区，并随断层上盘一起运动。

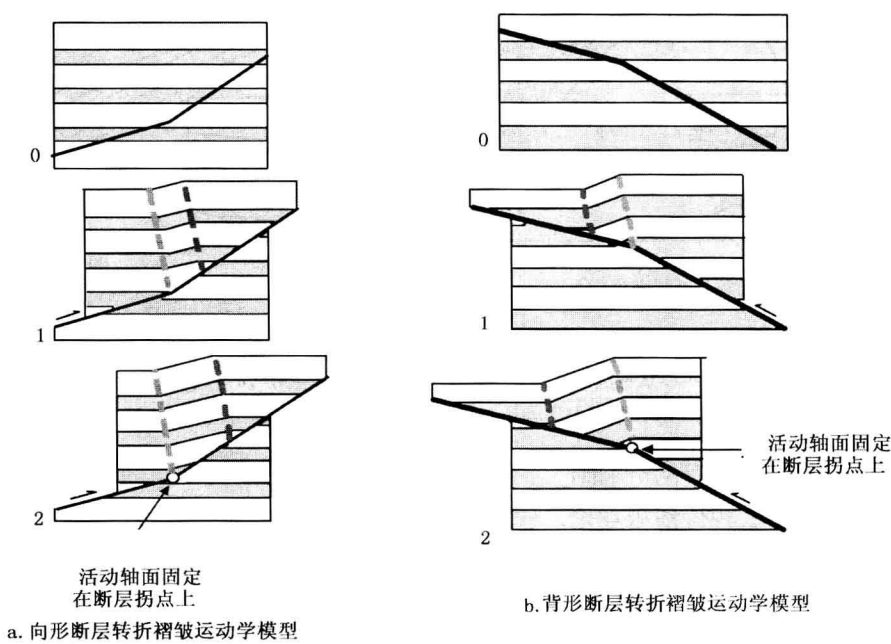


图 1-3 两类断层转折褶皱运动学模型（据 Shaw 等，2005）

断层转折褶皱的定量计算可以参考 Suppe（1983）提出的计算公式。假设褶皱过程岩层的长度和厚度不发生变化，断层转折褶皱的几何形态与下伏断层形态有下列定量关系（Suppe，1983）：

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{-\sin(\gamma - \theta) [\sin(2\gamma - \theta) - \sin\theta]}{\cos(\gamma - \theta) [\sin(2\gamma - \theta) - \sin\theta] - \sin\gamma} \right\}$$

$$\beta = \theta - \phi + (180 - 2\gamma)$$

式中， θ 为断层下段（下断坪）与地层夹角； ϕ 为断层上、下段最小夹角； β 为褶皱前翼岩层与断层夹角， γ 为轴面与两侧岩层夹角。确定四个角度参数（ θ ， ϕ ， β ， γ ）中任意两个值，就可以算出其他两个角，各角度关系见图 1-4，参数之间的关系能直接从图中读出。左图为背形断层转折褶皱，右图为向形断层转折褶皱。如果能从地震剖面中确定四个几何参数中的任意两个，则能通过读图确定另外两个角度。

由于断层转折褶皱能吸收或产生滑移量，断层的滑移量沿着断层的各个斜坡发生改变。断层滑移率 $R = S_1/S_0$ ， S_1 为断层上段滑移量， S_0 为断层下段滑移量。如果断层下段（下断坪）与地层夹角不等于零（ $\theta \neq 0$ ），背形断层转折褶皱吸收滑移量，滑移率（ R ）小于 1；向形断层转折褶皱则增加滑移量，滑移率（ R ）大于 1。